

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ES-SCIENCES PHYSIQUES

PAR

André PRUDHOMME

Licencié ès-Sciences

Docteur de l'Université de Lyon (mention Sciences)

Première Thèse : SUR LA NATURE DES PHÉNOMÈNES SOLAIRES SUSCEPTIBLES
DE MODIFIER LA CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE.

Deuxième Thèse : PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 27 Mai 1952, devant la Commission d'Examen

MM. BERNARD,

Président.

DUFAY,

JANIN,

QUENEY,

} *Examineurs.*

ANDRÉ - 5, RUE BUGAUD
LYON - 1952

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ES-SCIENCES PHYSIQUES

PAR

André PRUDHOMME

Licencié ès-Sciences

Docteur de l'Université de Lyon (mention Sciences)

Première Thèse : SUR LA NATURE DES PHÉNOMÈNES SOLAIRES SUSCEPTIBLES
DE MODIFIER LA CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE.

Deuxième Thèse : PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 27 Mai 1952, devant la Commission d'Examen

MM. BERNARD,

Président.

DUFAY,

JANIN,

QUENEY,

} *Examineurs.*

ANDRE - 5, RUE BUGEAUD
LYON - 1952



Doyen Honoraire

M. LONGCHAMON, O.   , Médaille de la Résistance,  I., +.

Professeurs Honoraires

MM. VESSIOT, C.  ,  I., Membre de
de l'Institut

DULAC, O.   I.

VANEY,  ,  I., +.

MEUNIER L., O.   I.

SIRE,  ,  I., +.

FROMAGEOT,  I.

LOCQUIN,  ,  I., Correspondant de
l'Institut

de LARAMBERGUE,  . A.

Doyen

M. DOUIN, O.   ,  I.

Assesseur

M. EYRAUD,  ,  I.

Professeurs

MM. LONGCHAMON, C.   , Médaille Résistance,  I., +, Minéralogie

DOUIN, O.   ,  I., Botanique

DEJARDIN, O.  ,  I., Physique Générale

SOLLAUD,   I., Zoologie

THIBAUD,  I., Physique atomique

EYRAUD,   I., Calcul différentiel et intégral

THORAL,  I., Géologie

DOEUVRE,  I., Chimie organique

CORDIER,  ,  I., Chevalier du Mérite Agricole, + , Physiologie

PRETIRE,  ,  I., Chimie industrielle

KÜHNER,  I., Botanique

COURTY,  A., Chimie-Physique

MALECOT,  A., Mécanique rationnelle

PARIS, Chimie minérale

AUMERAS,  I., Chimie

BERNARD,  A., Physique

VIRET,  ,  I., Géologie

COLONGE,  A., Chimie

Maître de Conférences honoraire

M. MOURIER DES GAYETS, $\S$ I., Chevalier du Mérite Agricole

Maîtres de Conférences

MM. MEUNIER P., $\S$ I., Chim. biol.

GILLES, $\S$ A., Botanique

JANIN, Physique

MOUSSA, Physique

NIGON, Zoologie

Mme CHAIX, $\S$ A., Chimie physiolog.

MM. MENTZER, Chimie biologique

WAUTIER, Zoologie

BRACONNIER, Mathématiques

CUEILLERON, Chimie

Chargés de cours complémentaires

MM. DUFAY, $\S$, $\S$ I., Astronomie et Physique supérieure

PIERRON, $\S$ A., Chimie

GARRIGUES, $\S$ A., Botanique

Mme FIASSON, Zoologie

MM. GAUTRIER H. Géologie

MESNARD, Physique

PENNANEAC H, Mathématiques

GAUTHIER J. Chimie

STRIEFLING, Météorologie

PELLETIER, Géologie

MAZENOT, Géologie.

MURET, Botanique

FIASSON, Zoologie

TRANCHAT, Physique

Secrétaire

M. ROUX, $\S$ I.

SUR LA NATURE DES PHENOMENES SOLAIRES SUSCEPTIBLES DE MODIFIER LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

La mise en évidence relativement récente de l'influence de l'activité solaire sur l'état électrique des couches ionosphériques, qui commande la propagation des ondes radioélectriques, a attiré de nouveau l'attention sur l'importance météorologique des fluctuations du rayonnement solaire. Comme la haute atmosphère n'est probablement pas sans influence sur la troposphère, les manifestations de l'activité solaire sont susceptibles d'intervenir dans l'évolution des situations météorologiques. On désigne souvent sous le nom d'héliométéorologie cette branche de la Science qui s'occupe des relations hypothétiques entre le Soleil et l'atmosphère météorologique.

L'étude qui suit exigera pour parvenir à des résultats définitifs non seulement des recherches plus complètes, mais aussi des moyens perfectionnés d'investigations de la haute atmosphère. Les répercussions de l'activité solaire sur la troposphère sont, en effet, extrêmement complexes et leur interprétation a toujours été sujette à controverses par suite de notre ignorance de leur base physique réelle. Il nous a cependant paru intéressant de préciser l'état d'avancement de nos recherches, afin de favoriser les tentatives d'application à la prévision du temps des indications que fournissent quotidiennement l'Observatoire de Meudon et le Laboratoire National de Radioélectricité.

CHAPITRE I

TRAVAUX STATISTIQUES D'HELIOMETEOROLOGIE

1° - Données astronomiques

Dans de nombreux travaux statistiques, qui ont eu pour but l'établissement de corrélations entre les manifestations de l'activité solaire et les éléments météorologiques, tels que la pression, la température et la quantité de pluie, le nombre de taches a été considéré comme variable représentative des fluctuations du rayonnement du Soleil. Rappelons que les séries d'observations de ce phénomène solaire, le plus directement observable, remontent à 1749 et que pour les rendre comparables, WOLF a introduit les nombres relatifs $r = K (10 g + f)$, où g est le nombre de groupes visibles ou de taches isolées, f le nombre de toutes les taches groupées ou non, k un facteur dépendant de l'instrument et de l'observateur. Les moyennes mensuelles de cette variable très pratique pour les travaux d'hélioclimatologie ont été publiées par W. BRUNNER en 1939 (1) et complétées récemment au moyen de représentations graphiques (2). Ces deux publications montrent l'importance de la périodicité undecennale. Des statistiques ont mis en évidence d'une façon plus précise d'autres variations périodiques secondaires.

Un cycle de 27 jours dans les nombres de WOLF apparaît comme l'un des plus importants dans les études héliométéorologiques. En outre, les caractères des variations undecennales des taches semblent présenter une période voisine de 80 ans.

En 1908 HALE avait émis l'hypothèse que les taches consistaient en des tourbillons d'ions et d'électrons.

Il devait en résulter un champ magnétique, dont HALE constata effectivement l'existence au moyen de l'effet ZEEMAN dans la distribution spectrale du rayonnement des taches. L'observation, basée sur de récentes périodes, a révélé qu'il y a identité entre le cycle magnétique complet des taches et une double période undecennale. On a été jusqu'à dire que le véritable cycle solaire était de 23 ans. Néanmoins comme les protubérances présentent des variations périodiques voisines de 11 ans, le cycle undécennal peut être considéré comme un ensemble complexe de perturbations solaires, dont les taches ne sont qu'un aspect (3).

Certains auteurs ont cherché à retrouver dans les valeurs successives des éléments météorologiques les cycles qu'on a cru observer dans les valeurs de la constante solaire, c'est-à-dire de la quantité d'énergie reçue par minute à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface de 1 cm^2 , normale aux rayons solaires, la terre étant supposée à sa moyenne distance du Soleil. Les mesures étant faites au sol au moyen de pyrhéliomètres, il est

nécessaire de les corriger de l'absorption atmosphérique par réduction à la normale du spectre solaire, relevé avec un bolomètre sous différents angles zénithaux.

Les résultats d'ABBOT montrent depuis 40 ans en différents points de la Terre des différences supérieures à 4 %, alors qu'ils seraient comparables à 1 % près selon l'auteur (4). La variation du rayonnement solaire serait localisée principalement dans l'ultraviolet extrême, où elle atteindrait d'un jour à l'autre jusqu'à 500 % selon des observations faites au Mont Wilson (5). Ces résultats ont été critiqués : il convient de remarquer d'une part que la dispersion des valeurs de la constante solaire s'atténue avec l'augmentation de la précision des mesures et d'autre part que le rayonnement de courte longueur d'onde ($\lambda < 5000 \text{ \AA}$), évalué en dehors de notre atmosphère, présente des modifications en corrélation très nette avec les variations de transparence de l'atmosphère. On peut donc se demander s'il ne s'agit pas d'erreurs dans l'évaluation de l'absorption atmosphérique, intense dans l'ultraviolet à cause de l'oxygène et de l'ozone, et un doute existerait sur la réalité de la variation de la constante solaire (6). Il est toutefois difficile de ne pas admettre la réalité de variations rapides, enregistrées simultanément au Mont Wilson et en Algérie, et de fluctuations à longue période éliminant les erreurs instrumentales et se rattachant à d'autres manifestations de l'activité solaire. La solution de cette question capitale dépend des progrès de nos connaissances sur l'absorption ultraviolette de la haute atmosphère. ABBOT a cru pouvoir affirmer que la variation de la constante solaire suivait un cycle principal de 273 mois et il a séparé dans ses observations l'influence de 14 périodicités, fractions de cette période (4). Il a été jusqu'à mettre en évidence des périodes courtes, de 27,0074 et 6,6456 jours, pour l'étude des singularités de certains éléments météorologiques. De telles assertions ont été évidemment contestées.

2° - Résultats des travaux statistiques d'héliométéorologie

La plupart des recherches statistiques d'héliométéorologie n'ont donné que des résultats décevants, malgré la somme énorme de documents exigée pour leur réalisation. Quelle que soit la variable solaire adoptée, nombres relatifs de WOLF ou variations de la constante solaire, les conclusions, auxquelles ont abouti les auteurs de ces travaux, sont très divergentes. Ayant en vue une application des données solaires à la prévision du temps, il ne nous a pas paru nécessaire d'en faire ici même un exposé détaillé. Nous nous sommes contentés d'extraire d'une mise au point récente (7a), que nous avons rédigée sur ces travaux statistiques, les résultats les plus intéressants et les moins contradictoires entre eux.

Une remarque générale s'impose : la plupart de ces études ont traité sans grand succès de moyennes mondiales ou hémisphériques des éléments météorologiques, comme la pression, la température ou les précipitations ; les auteurs les plus récents se sont cependant attachés au problème de la répartition des phénomènes météorologiques et ce sont ceux qui ont obtenu les corrélations les plus nettes.

En ce qui concerne la pression atmosphérique, il semble résulter des statistiques mondiales de CLAYTON (8a & b) que, lorsque l'activité solaire, caractérisée par les nombres de WOLF, augmente, les zones de basses pressions,

près de l'Equateur et du 60ème parallèle, s'intensifient, alors que les zones de hautes pressions, situées normalement entre les 60ème et 40ème parallèles, se renforcent en se déplaçant vers les Pôles. La seule influence décelable de l'activité solaire serait donc une évolution des centres d'action de la circulation générale.

Les autres résultats sont peu nets : les coefficients de corrélation, par exemple ceux de WALKER, ont des valeurs très faibles. WILLETT attribue les causes de cet insuccès aux procédés statistiques employés (9a) : on a considéré des moyennes annuelles ou hémisphériques, alors que les effets de l'activité solaire peuvent très bien différer avec la période et la nature de la région considérées. A l'appui de cette dernière hypothèse, notons que le problème de la répartition des centres de pression en fonction de l'activité solaire a été traitée avec un certain succès par deux recherches américaines récentes (10-11) : leurs auteurs ont prouvé statistiquement que d'une façon générale à un accroissement du nombre des taches correspondaient une proportion plus élevée et une extension des anticyclones continentaux, favorisant un blocage des perturbations de l'Océan, où se creusaient les dépressions.

La plupart des coefficients de corrélation, calculés entre les températures au sol, qu'il s'agisse de moyennes mondiales ou annuelles ou encore de valeurs particulières, et les nombres de taches n'atteignent pas des valeurs significatives.

Ayant pour but principal de justifier la réalité des variations de la constante solaire observées, ABBOT aurait mis en évidence un cycle approximatif de 6,6456 jours dans les températures de Washington entre 1910 et 1945 avec une amplitude comprise entre 2° et 20° F (4). Bien qu'ayant reconnu l'existence de décalages de phase par rapport au cycle correspondant de la constante solaire, ABBOT a néanmoins utilisé ce résultat pour établir à Washington depuis le début de 1948 des prévisions de température un an à l'avance. Ces pronostics, confrontés par ALDRICH avec les observations réelles, constitueraient, selon les auteurs, une réussite très brillante de prévisions de températures en excès sur la normale de l'époque correspondante. Par contre, ces conclusions sont contestées par le Weather Bureau, d'après ses propres observations (12). On ne peut donc encore se prononcer sur la valeur de la méthode d'ABBOT, qui fait appel à des hypothèses contestées sur le rôle et la réalité même des variations de la constante solaire.

Les résultats des corrélations entre précipitations et activité solaire présentent également une grande dispersion. Il est remarquable de constater que, comme pour la pression, la considération de hauteurs moyennes de pluie sur des continents entiers n'a été suivie d'aucun résultat net et que, par contre, l'étude locale de GUYOT en Suisse a donné lieu à des conclusions intéressantes pour l'hydroélectricité (13). Selon ce dernier auteur, les périodes voisines des maxima de l'activité solaire, caractérisée par les nombres de WOLF, correspondent en Suisse aux années les moins pluvieuses. Il semble donc logique d'en déduire que l'activité solaire influence davantage la répartition des pluies que leur quantité mondiale.

ABBOT a étudié également le problème des cycles de précipitations à Washington d'une manière similaire à celui des températures. Il n'a pu mettre en évidence qu'un accord partiel avec le cycle solaire de 27,0074 jours (4). Le Weather Bureau considère même cet accord comme inexistant.

On a enfin cherché à relier les grandes périodes climatiques à différentes phases de l'activité solaire. WILLETT a fait récemment des études critiques sur les travaux de cet ordre (9a et b). Il est nécessaire de remarquer que parmi les données les plus récentes, donc les plus dignes de confiance, les corrélations entre les cycles de BRUCKNER en Europe et l'activité solaire ne sont pas significatives. Les études récentes de VISSER (14 a, b et c) semblent montrer que les hivers excessifs d'Europe Centrale s'accumulent pendant les maxima de la période longue, de l'ordre de 80 ans, des taches solaires. Le résultat est peu net et, d'ailleurs, en désaccord avec l'étude de SCHERHAG sur le même sujet. En ce qui concerne les recherches sur les périodes climatiques de longue durée, les époques géologiques par exemple, on ne peut leur attribuer aucun crédit, car elles font appel à des données astronomiques inexistantes sur l'activité solaire.

3° - Orientation moderne de l'héliométéorologie

La brève analyse des travaux statistiques d'héliométéorologie, que nous venons de faire, suffit à montrer que ces recherches n'ont pas abouti à des résultats caractéristiques. La cause d'un tel échec n'est probablement pas l'inexistence de relations entre l'activité solaire et les phénomènes météorologiques, mais notre ignorance de leur base physique réelle. Aussi certaines théories modernes ont essayé d'interpréter le mécanisme d'action du rayonnement solaire sur l'atmosphère. Leur grand intérêt provient de ce que les corrélations les plus remarquables établies entre les nombres de taches et les éléments météorologiques concernent la répartition des centres d'action anticycloniques ou dépressionnaires, ainsi que nous venons de le voir.

Une orientation nouvelle des études d'héliométéorologie, dans laquelle on chercherait à tenir compte d'hypothèses vraisemblables concernant l'absorption du rayonnement des grandes manifestations de l'activité solaire et son influence sur la circulation troposphérique, nous a donc paru susceptible d'aboutir à des résultats moins décevants que nombre de précédentes recherches.

CHAPITRE II

HYPOTHESE EMISE CONCERNANT LE MECANISME D'ACTION DE L'ACTIVITE SOLAIRE SUR LA BASSE ATMOSPHERE

Sous ce titre, nous exposons et nous critiquons ensuite une théorie, récemment émise outre Atlantique, qui a servi de guide à nos recherches.

1° - Théorie d'HAURWITZ (15 a et b)

L'ozone est considéré par HAURWITZ comme l'intermédiaire indispensable entre l'activité solaire et les phénomènes météorologiques susceptibles d'en dépendre. Sa théorie fait appel à la formation de centres thermiques dans l'ozonosphère sous l'action temporaire du rayonnement ultraviolet intense provenant des éruptions chromosphériques observées sur le Soleil au voisinage des taches. Bien que la plus grande partie des radiations solaires ultra-violettes soit absorbée par l'oxygène de la haute atmosphère, le rayonnement compris entre 1850 et 3000 Å parvenant à l'ozonosphère possède encore une fraction non négligeable de son énergie initiale et son accroissement au moment des phénomènes éruptifs est considérable. Son absorption par l'ozone ne peut avoir un effet calorifique uniformément réparti dans tout l'ozonosphère. L'élévation de température serait, selon HAURWITZ, plus importante dans les régions de basse latitude, en raison de la variation de l'énergie solaire avec l'angle d'incidence. D'autres facteurs, comme des nuages locaux d'ozone, sont susceptibles de provoquer des anomalies thermiques, mais HAURWITZ a fait l'hypothèse qu'en moyenne la distribution de l'effet thermique de l'absorption, par l'ozone, du rayonnement ultraviolet d'une éruption chromosphérique devait être uniquement fonction de la latitude. L'auteur en a déduit que dans ces conditions devait s'établir une circulation importante de l'ozone de l'Equateur vers les Pôles.

La théorie indique que l'on doit s'attendre à des effets de ces grandes variations de la circulation ozonosphérique jusque dans la troposphère, mais l'auteur n'a émis aucune hypothèse concernant le mécanisme physique de leur action sur la basse atmosphère. Par contre, il a fait remarquer que toutes les éruptions chromosphériques, dont l'importance est variable, ne produisaient probablement pas les mêmes effets et il a suggéré comme recherche primordiale de déterminer avec nos moyens actuels la nature des perturbations solaires dont les réactions s'étendent jusque dans la basse atmosphère.

2° - Critique de la théorie précédente

Le mécanisme d'action, dont HAURWITZ a fait l'hypothèse, repose entiè-

rement sur le déclenchement dans l'ozonosphère de mouvements méridiens consécutifs à la variation thermique susceptible d'être créée par l'absorption du rayonnement ultraviolet intense des éruptions chromosphériques. Il semble nécessaire d'ajouter au schéma précédent le rôle important joué par le facteur température dans l'équilibre photochimique de l'ozone (16 a) : A. et E. VASSY ont ainsi expliqué la répartition moyenne de ce gaz en fonction de la latitude et de la saison.

Il résulte de mesures stratosphériques que la température de l'ozonosphère doit être en moyenne plus élevée dans les régions polaires que près de l'Equateur. Il existe seulement une faible période en hiver, pendant laquelle ce champ thermique normal peut s'inverser : BARBIER, CHALONGE et VASSY ont, en effet, observé un relèvement systématique de la température de l'ozone entre la fin de l'hiver et le début du printemps à Abisko par $68^{\circ}20'$ de latitude Nord (16b). Cette variation thermique montre que la température moyenne de l'ozone est sous l'étroite dépendance du rayonnement solaire, dans le sens prévu par les calculs théoriques de GOWAN (17). En règle générale on peut donc affirmer que les régions polaires de l'ozonosphère sont relativement chaudes par rapport aux autres secteurs. Le rôle photochimique de la température moyenne y contribue donc à accroître la teneur en ozone.

Selon les hypothèses d'HAURWITZ, une éruption chromosphérique risque de modifier ce régime : pendant un court laps de temps, ce sont les régions équatoriales ou subtropicales qui deviennent relativement chaudes dans l'ozonosphère, avec création d'ozone par suite du rôle photochimique de l'élévation de température. L'effet thermique de l'éruption chromosphérique dans l'ozonosphère étant probablement d'assez courte durée, les régions polaires doivent rapidement reprendre leur rôle normal de centre relativement chaud avec formation photochimique de l'ozone. Cette perturbation thermique d'origine solaire est donc susceptible de causer des variations de répartition méridienne d'ozone et, en résumé, on doit prévoir dans l'ozonosphère à la suite de l'afflux du rayonnement ultraviolet intense d'une éruption chromosphérique :

a) Un réchauffement important, mais de courte durée, des régions équatoriales, avec augmentation de la teneur en ozone.

b) Le retour progressif au champ thermique normal, dans lequel les régions polaires possèdent une température plus élevée que les autres secteurs, activant la formation photochimique de l'ozone.

Ces transformations thermiques sont susceptibles de favoriser les déplacements méridiens d'ozone de l'Equateur vers les Pôles et inversement. Il y a lieu de remarquer, en outre, que les lignes de courant des particules d'ozone dépendent de la situation isobarique à l'altitude de l'ozonosphère et que les mouvements méridiens envisagés doivent se faire selon des directions privilégiées, particulières à chaque situation.

Comme nos sondages actuels de l'atmosphère ne nous permettent pas encore de raisonner sur des cartes d'isobares à l'altitude de l'ozonosphère, il est nécessaire de tenter un contrôle limité des hypothèses émises au moyen des effets troposphériques, que l'on est raisonnablement en droit d'attendre à la suite des modifications de la répartition de l'ozone. Les relations entre la valeur de l'épaisseur réduite de l'ozone atmosphérique et la situation

météorologique dans la troposphère ont fait l'objet de nombreuses communications, qui montrent que la teneur en ozone varie avec l'origine de la masse d'air. Les mesures poursuivies depuis plus de vingt ans par DOBSON (18, 19) ainsi que celles d'un certain nombre d'auteurs comme CHALONGE (20) indiquent que les fortes quantités d'ozone correspondent aux expulsions d'air arctique et les faibles teneurs aux invasions tropicales. Les observations d'A. et E. VASSY à Ifrane (Maroc) précisent ces conclusions : il semble exister un certain décalage entre l'arrivée d'une masse d'air au sol et dans la stratosphère, la diminution d'ozone précédant d'un jour ou deux l'afflux d'air saharien (16c).

Pour accorder les résultats de ses mesures en Chine avec les observations Européennes, P. LEJAY a été conduit à admettre que les variations de la quantité d'ozone seraient dues à des glissements de masses atmosphériques des Pôles vers l'Equateur ou inversement de l'Equateur vers les Pôles et que ces déplacements dans la haute atmosphère seraient en rapport étroit avec ceux de la basse atmosphère (21). Les théories actuelles ne permettent pas de préciser les relations de cause à effet qui existent entre les circulations atmosphériques à des niveaux aussi différents que l'ozonosphère et les basses couches. On peut seulement déduire des mesures d'ozone faites en plusieurs points du globe que les variations de répartition méridienne de ce gaz s'accompagnent de transformations dans la circulation troposphérique, en moyenne zonale. Dans cette hypothèse, en tenant compte des résultats des mesures spectrographiques d'ozone cités, la perturbation atmosphérique, consécutive à une éruption chromosphérique, pourrait consister dans les basses couches en des invasions d'air tropical vers des latitudes plus élevées et des descentes en latitude d'air arctique, en relation avec un afflux d'ozone dans les régions polaires à haute altitude. Comme pour les particules d'ozone, la position de ces mouvements méridiens doit dépendre de la situation météorologique préexistante. L'activité solaire n'aurait pour effet, dans ces conditions, que le déclenchement ou le développement dans la circulation troposphérique, en moyenne zonale, d'invasions méridiennes de masses d'air se superposant au régime initial, dont il faut tenir compte. Ce rôle des perturbations solaires dans l'évolution des types de temps a fait l'objet d'un récent exposé de WILLETT (9c). Cet auteur a groupé les modifications de la circulation générale troposphérique en trois classes :

a) Les variations de courte période, observées quotidiennement dans les mouvements de masses d'air et n'entraînant que de faibles perturbations dans le type de circulation générale.

b) Les variations accidentelles qui, en peu de jours, changent radicalement le type de circulation sur tout un hémisphère.

c) Les variations à longue période, s'étendant sur des mois ou des années et caractérisées par le retour persistant et durable d'un des types de circulation du deuxième groupe.

Les variations du groupe (a) sont internes à la circulation troposphérique, ne dépendent que de son état initial et n'ont pas retenu l'attention de WILLETT. Quant aux variations du groupe (b), que l'on observe surtout sur des cartes moyennes de 5 jours, et du groupe (c) il ne semble pas possible de les interpréter à partir du seul état initial de la circulation atmosphérique et l'auteur suggère comme explication possible la théorie

d'HAURWITZ, en supposant que les mouvements de l'ozonosphère puissent se refléter par des changements dans les types de circulation générale.

Les développements théoriques qui précèdent ne peuvent prétendre expliquer toutes les transformations du rayonnement solaire ultraviolet qui interviennent dans l'atmosphère. Une théorie complète devrait résoudre le problème de l'équilibre des rayonnements émis et absorbés à différents niveaux de la stratosphère en fonction de la répartition de l'ozone. L'étude de l'absorption infrarouge de l'ozone montre l'importance de la bande d'absorption située entre 9 et 10 μ (7b). L'émission spectrale de la Terre, calculée par ADEL et ses collaborateurs (22) en la considérant approximativement comme celle d'un corps noir à 287° K est, en effet, maxima dans la région de 10 μ , zone de transmission relative des constituants atmosphériques autres que l'ozone. DEVAUX a donc fait remarquer que l'ozone, en raison de son absorption vers 9-10 μ correspondant au maximum de l'émission terrestre, commande en grande partie la température de la Terre et se trouve ainsi doté d'une grande influence climatique (23a et b). Les variations de répartition de ce gaz, consécutives ou non aux manifestations de l'activité solaire, sont donc susceptibles de provoquer des fluctuations considérables dans les effets du rayonnement de la Terre et de modifier, par conséquent, l'évolution normale des centres d'action de la circulation générale troposphérique. Le rôle radiothermique de l'ozone apparaît ainsi d'une importance exceptionnelle en Météorologie; il est susceptible d'expliquer les relations observées entre les mouvements ozonosphériques ainsi que les variations d'épaisseur réduite d'ozone d'une part et les glissements de masse d'air troposphériques d'origines différentes d'autre part. Malheureusement notre connaissance de la stratosphère est encore trop incomplète et les phénomènes radiatifs dans l'atmosphère trop compliqués et trop peu connus pour qu'on puisse résoudre une telle question (3). Aussi avec les moyens dont nous disposons, nous sommes-nous limités à la recherche primordiale suggérée par HAURWITZ (15b), c'est-à-dire la détermination de la nature des perturbations solaires, dont les réactions s'étendent jusque dans la basse atmosphère. Nous avons conduit notre recherche en nous appuyant sur l'hypothèse simplificatrice du parallélisme des mouvements ozonosphériques et troposphériques à grande échelle, au décalage près de quelques jours par suite de l'inertie atmosphérique. Nous avons ainsi contrôlé l'action des manifestations de l'activité solaire dans la basse atmosphère par le développement, prévu par voie théorique, d'importantes invasions méridiennes de masses d'air d'origines tropicale et arctique.

CHAPITRE III

CHOIX DES ELEMENTS DE COMPARAISON

ENTRE LES DIVERSES MANIFESTATIONS DE L'ACTIVITE SOLAIRE

ET LES REGIMES DE CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

1° - Indications caractéristiques de l'activité solaire

Plusieurs variables, susceptibles de caractériser l'activité solaire, peuvent être prises en considération. Le procédé le plus simple consiste à utiliser les nombres relatifs de WOLF. En ce qui concerne le but que nous poursuivons, cette variable a le défaut de mélanger les taches actives du point de vue éruptif et les taches inactives.

Le phénomène solaire dont la correspondance terrestre apparaît la mieux établie est ce qu'on appelle une éruption chromosphérique (flare en langue anglaise). Les propriétés de ce phénomène ont été décrites en détail (24 a et b). Rappelons seulement que la perturbation se produit au voisinage des taches, dans la plage faculaire qui les accompagne, et qu'on la suit aisément sur des spectrohéliogrammes obtenus avec la raie H_{α} de l'hydrogène. L'évolution des taches et des facules qui accompagnent ces éruptions est maintenant bien connue (24 c) : après une période de croissance de durée assez variable, mais qui est habituellement de l'ordre de 8 jours, les deux phénomènes associés, que l'on désigne par l'expression centre d'activité atteignent leur importance maxima. Puis les taches diminuent, les facules perdent graduellement leur éclat et, en moyenne, au bout de deux mois, il ne reste plus aucune trace du centre d'activité. C'est presque toujours pendant la croissance de celui-ci que les éruptions se produisent.

Les résultats des observations spectrohéliographiques internationales sont publiés dans les "Quarterly Bulletin of Solar Activity". Dans ces publications nous avons relevé pour 1946 et 1947 les éléments caractéristiques des observations directes de l'activité solaire. Nous avons porté sur un graphique :

- 1°) Le nombre journalier de WOLF
- 2°) Les éruptions chromosphériques exceptionnelles
- 3°) La somme des importance des principaux centres d'activité présents chaque jour des deux années 1946 et 1947. Ce dernier point mérite d'être précisé. Les "Quarterly Bulletin of Solar Activity" nous fournissent l'importance de chaque centre d'activité, chiffrée de 1 à 10, la durée de ce phénomène, son âge au méridien central et le nombre d'éruptions distinctes observées sur chacun d'eux. A partir de ces éléments, il est donc possible de reconstituer une carte quotidienne des centres d'activités sur le Soleil, ce qui nous a

permis de calculer les sommes journalières des importances des centres les plus actifs. Pour distinguer ces derniers, nous avons d'abord choisi les plus jeunes : nous avons éliminé tous ceux dont l'âge de passage au méridien central était supérieur à 33 jours. Nous n'avons gardé ensuite que ceux dont l'importance chiffrée était supérieure à 5 et le nombre d'éruptions distinctes observées supérieur à 6. Cette dernière limite correspond à la moyenne des éruptions observées sur chacun des 1600 centres d'activité photographiés entre 1935 et 1948.

Les perturbations d'ordres radioélectrique et magnétique, en relation étroite avec les phénomènes solaires, sont également susceptibles de donner de précieuses indications sur l'activité du Soleil. Il est établi maintenant que dans 70 % au moins des cas l'apparition d'une éruption, quelle que soit sa position sur le disque solaire, est associée :

- a) à un évanouissement dans la propagation des ondes radioélectriques courtes
- b) à un renforcement des ondes longues.
- c) à un crochet dans le tracé des enregistreurs du magnétisme.

Ces trois phénomènes apparaissent à la minute même où l'on observe l'éruption et seulement dans les régions éclairées par le Soleil. Puis avec un retard moyen d'une trentaine d'heures, un orage magnétique peut se produire, accompagné parfois d'une aurore polaire visible sous nos latitudes (24c).

Dans nos graphiques annuels (1946-1947) nous avons indiqué les orages ionosphériques, relevés sur les bulletins du Service de Prévision Ionosphérique de la Marine (S.P.I.M.), qui fournissent en même temps l'importance de la perturbation enregistrée. En ce qui concerne les phénomènes magnétiques, E. et O. THELLIER nous ont communiqué la liste complète des grands orages magnétiques qui leur ont servi à faire la distinction entre les orages à début brusque et ceux récurrents à début progressif (25 et 26). Sur nos graphiques annuels nous avons ajouté au relevé de ces perturbations la courbe représentative des indices magnétiques internationaux C quotidiens.

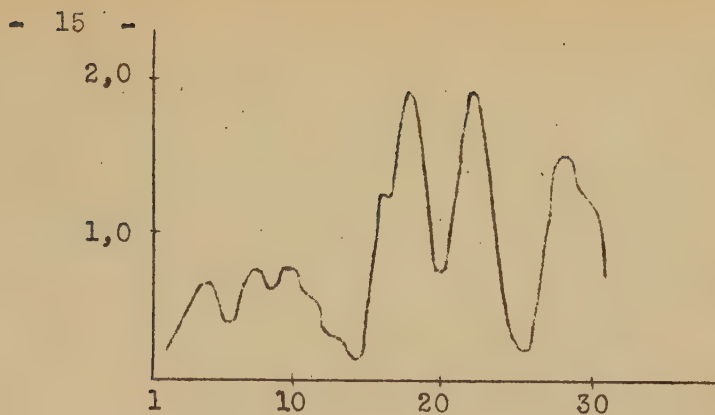
A titre d'exemple, nous donnons la reproduction (Figure 1) d'une fraction des graphiques annuels des variables représentatives de l'activité solaire pour 1946 et 1947, que nous avons établis. Nous avons choisi comme période le mois de Septembre 1946.

2° - Classification des situations météorologiques

Les situations météorologiques des années 1946 et 1947 ont été étudiées sur les cartes au sol et en altitude des Bulletins Quotidiens d'Etudes, éditées par l'Etablissement Central de la Météorologie (ex O.N.M.). Ces cartes synoptiques couvrent en moyenne l'Atlantique Nord et l'Europe occidentale entre 50° W et 25° E en longitude d'une part et entre 30° N et 70° N en latitude d'autre part.

Le classement des situations doit mettre en relief avant tout l'éventualité de la superposition d'invasions méridiennes de masses d'air à la

Nombres caractéristiques
magnétiques internationaux
(indice C)



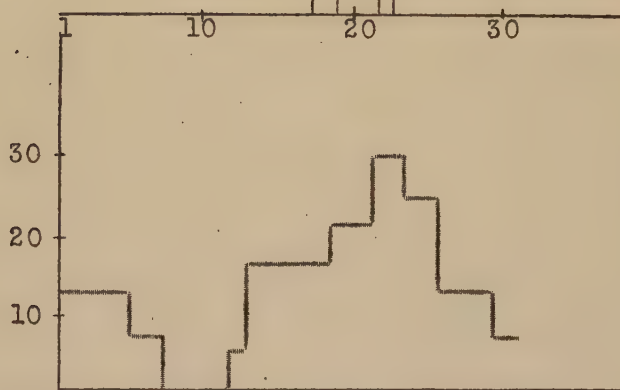
Orages magnétiques

D B D BF D P

Orages ionosphériques

↑ ↑ ↑

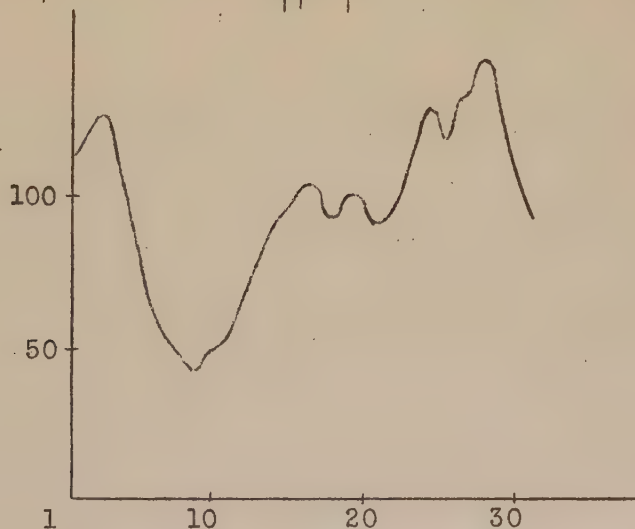
Importance des centres
d'activité principaux.



Eruptions exceptionnelles
observées

↑ ↑ ↑

Nombres quotidiens de WOLF



Date

1 10 20 30 Septembre

FIGURE 1

circulation troposphérique normale, en moyenne zonale, à la suite d'une perturbation solaire. Aussi, parmi les différentes classifications possibles, nous en avons adopté une qui fait appel à la position et à l'extension des centres d'action anticycloniques. Nous avons été amenés à distinguer quatre types de circulation. Il nous a été parfois délicat d'affecter à un de ces régimes certaines situations et, dans ce cas, nous avons cherché à éliminer le caractère subjectif de ce classement en prenant conseil de certains de nos collègues.

Notre classification est ainsi conçue :

1er Cas - Régime d'Ouest sans extension anticyclonique notable, donc pratiquement zonal.

2ème Cas - Régime d'Ouest avec une extension modérée d'anticyclones subtropicaux, situés entre les Açores et les Balkans. C'est le cas, par exemple, d'un développement vers le Nord de l'anticyclone des Açores, qui donne lieu à un régime de Nord Ouest sur la France.

3ème Cas - Rejet du régime d'Ouest par une extension anticyclonique qui peut être :

a) d'origine subtropicale; c'est le cas, par exemple, de l'extension classique vers le Nord Est de l'anticyclone des Açores avec formation d'une dorsale importante de hautes pressions sur l'Europe Occidentale.

b) d'origine continentale, auquel cas coexistent souvent un axe de hautes pressions allant des Açores à la Russie et une dépression en Méditerranée. Cette situation se rattache généralement à la précédente.

c) d'origine polaire, auquel cas le régime d'Ouest est rejeté à des latitudes beaucoup plus basses que ne l'indiquent les cartes moyennes de l'époque correspondante.

4ème Cas - Barrage anticyclonique. L'extension des hautes pressions bloque totalement le régime d'Ouest zonal sur une partie de la carte étudiée. On peut également classer ce régime suivant la nature des hautes pressions :

a) barrage par extension totale vers le Nord d'un anticyclone subtropical. Dans le cas où il s'agit de l'anticyclone atlantique, par exemple, on a une circulation européenne indépendante.

b) barrage par extension totale vers le Sud de l'anticyclone polaire (cas assez rare).

c) barrage par soudure des extensions anticycloniques subtropicale et polaire (cas le plus fréquent).

CHAPITRE IV

RESULTATS DES COMPARAISONS

1° - Méthode graphique

Le but cherché est de comparer les situations météorologiques de 1946 et 1947 avec les courbes des variables caractéristiques de l'activité solaire, dont nous avons donné un exemple. Pour le réaliser nous avons reporté sur un transparent le résultat du classement des cartes synoptiques quotidiennes de ces années. Nous avons affecté à chacun des quatre régimes distingués un palier sur le transparent utilisé. Chaque régime possède ainsi son ordonnée propre sur le graphique. En abscisses se trouvent les dates successives, soient 730 pour les années 1946 et 1947. On obtient donc une courbe annuelle "en escalier", dont nous donnons à titre indicatif la reproduction (fig. 2) pour le mois de Septembre 1946, déjà choisi comme exemple des variables caractéristiques de l'activité solaire. Aux ordonnées croissantes correspond une extension méridienne des centres d'action anticycloniques et, par conséquent, un déclenchement ou un développement d'invasions méridiennes de masses d'air.

Le transparent a ensuite été appliqué sur chacune des courbes des variables caractéristiques de l'activité solaire, avec les dates en phase d'abord, puis avec un décalage dans un sens tel que les périodes des perturbations solaires précèdent de 1 jour, puis de 2, etc., les dates correspondantes des situations synoptiques. Nous avons ainsi recherché graphiquement si une évolution météorologique caractéristique faisait suite aux mêmes accidents des différentes courbes d'activité solaire.

On peut résumer ainsi les résultats des diverses comparaisons :

a) La courbe des nombres de WOLF est prise pour base. Nous n'avons pas réussi à trouver un décalage tel que chaque maximum important de cette courbe corresponde à un palier déterminé du graphique des situations météorologiques. On peut seulement remarquer que la majorité des périodes où le nombre de WOLF est élevé précède de quelques jours, 1 à 5, les situations à extensions anticycloniques méridiennes, ou à barrages, mais le contraire a également lieu. Il est à noter que ce résultat est en accord avec ceux des deux recherches américaines récentes (10 - 11), que nous avons déjà citées dans notre analyse des travaux statistiques d'héliométéorologie. Leurs auteurs n'ont, en effet, mis en évidence une relation entre l'accroissement du nombre des taches et l'extension des anticyclones continentaux que d'une façon moyenne : il ne s'agit pas d'une règle systématique, mais seulement d'un résultat statistique moyen.

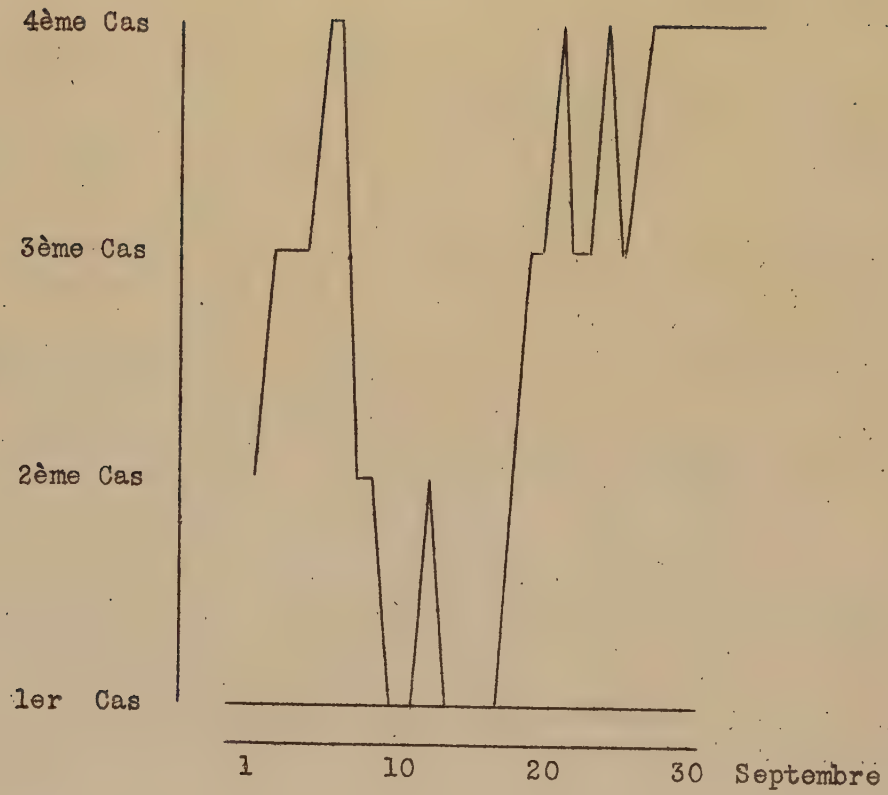


FIGURE 2

b) La courbe des importances des principaux centres d'activité est prise pour base. Les remarques du paragraphe (a) restent valables, à cette différence près que la proportion des cas de coïncidences est un peu plus élevée. Il en est de même des périodes où se groupent les éruptions exceptionnelles observées, par exemple vers le 15-20 septembre 1946.

c) Prenant pour indices d'activité solaire les perturbations d'ordres radioélectrique et magnétique, nous avons obtenu des relations beaucoup plus nettes. En décalant le transparent, sur lequel sont reportés les caractères des centres d'action de la circulation atmosphérique, de 4 à 5 jours, nous avons remarqué que tous les orages magnétiques, à l'exception d'un seul, se trouvaient en coïncidence avec des situations à rejet ou à barrage du régime d'Ouest. Quant aux orages ionosphériques, relevés sur les bulletins du S.P.I.M., comme ils sont très voisins des fortes perturbations magnétiques, le résultat de la comparaison reste valable. Aussi à l'avenir nous nous limiterons aux caractères et aux orages magnétiques, plus détaillés et plus faciles à interpréter que les indices ionosphériques.

A titre d'exemple, nous donnons la reproduction d'un certain nombre de comparaisons graphiques significatives. Nous avons choisi deux exemples de passage d'un régime quasi zonal à une situation où prédominent de fortes extensions anticycloniques, allant jusqu'au barrage du régime d'Ouest, à la suite des orages magnétiques du 7 Février 1946 et du 30 Août 1946 (Figures 3 et 4), puis un exemple de prolongement exceptionnel d'une situation à fortes extensions anticycloniques méridiennes après l'orage magnétique du 9 Novembre 1947 (Figure 5). On peut également se reporter aux courbes déjà tracées (figures 1 et 2) du mois de Septembre 1946, qui constituent un exemple de développement d'invasions méridiennes de masses d'air et de leur persistance à la suite de perturbations magnétiques extrêmement importantes.

Ainsi les comparaisons graphiques effectuées nous permettent d'énoncer que seules parmi toutes les perturbations solaires étudiées, celles qui sont déjà accompagnées d'agitations de la part du magnétisme terrestre et souvent de la part de l'ionosphère sont susceptibles de provoquer des réactions à courte échéance dans la circulation troposphérique. Les orages magnétiques importants paraissent suivis d'une évolution synoptique caractéristique, qui peut se subdiviser en deux cas d'après nos graphiques : soit le prolongement d'une situation préexistante à forts développements anticycloniques méridiens, soit le passage d'un régime quasi zonal à un rejet ou à un barrage du régime d'Ouest. Ces deux processus ne sont nullement contradictoires au développement d'invasions méridiennes de masses d'air d'origines tropicale et arctique, prévu d'après notre interprétation de la théorie d'HAURWITZ sur l'influence de l'activité solaire dans les phénomènes météorologiques.

Il n'est pas étonnant que les relations trouvées concernent principalement les perturbations solaires donnant lieu à des conséquences géomagnétiques importantes. En effet, on explique les orages magnétiques et le retard qu'ils présentent sur le phénomène solaire, en supposant que celui-ci émet des particules formant un jet plus ou moins dirigé susceptible d'atteindre ou non la Terre. Ces particules voyageraient avec une vitesse de l'ordre de 1500 Km/sec, de sorte qu'elles parcourraient la distance Soleil-Terre en 28 heures environ, valeur moyenne du retard des orages magnétiques sur les éruptions chromosphériques (24 c). Une hypothèse du même ordre peut se concevoir pour les phénomènes troposphériques : le décalage moyen de 4 jours

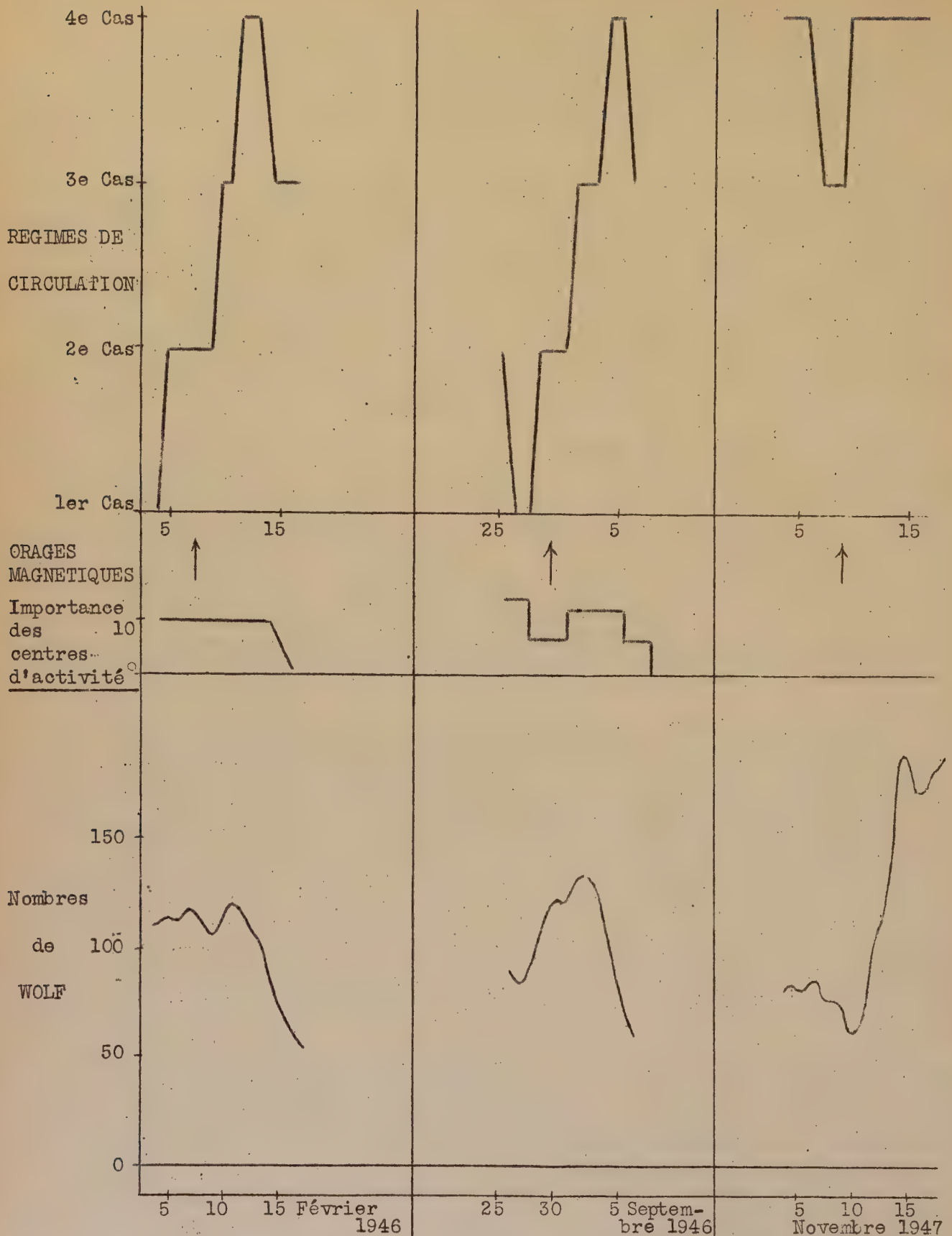


FIGURE III

FIGURE IV

FIGURE V

serait dû à l'inertie atmosphérique, la haute atmosphère en général et l'ozonosphère en particulier servant d'intermédiaires entre l'action directe du rayonnement solaire ultraviolet, lorsque celui-ci leur parvient avec une intensité fonction du nombre d'éruptions chromosphériques, et l'évolution des centres anticycloniques de la basse atmosphère. Il est possible également que les régions solaires appelées M par J. BARTELS (27) et dotées d'un rayonnement continu susceptible de produire les orages magnétiques à début progressif (25 et 26), aient une influence sur la basse atmosphère, au même titre que les centres d'activité éruptifs, auxquels semblent liés les orages magnétiques à début brusque. Ainsi s'expliqueraient les périodes, peu nettes d'ailleurs, voisines de 27 jours que l'on a mises plusieurs fois en évidence dans les phénomènes météorologiques (28), en particulier dans les précipitations (4). Leur absence de netteté proviendrait de l'influence apériodique des phénomènes solaires éruptifs, qui est prédominante par rapport au rayonnement des régions M.

2° - Méthode statistique

Des méthodes statistiques modernes, que nous avons extraites d'un cours récemment paru (29), nous ont permis de préciser les résultats précédents. Nous appuyant sur ces derniers, nous avons recherché en premier lieu la contingence entre le caractère magnétique de chaque jour des années 1946 et 1947 et le régime météorologique établi 4 jours plus tard. Nous avons choisi comme caractère magnétique les moyennes journalières des indices K tri-horaires, donc plus précis que les indices C. Nous les avons réparties en 7 classes : 0 à 10, 10 à 20, ..., 60 à 70, de 10 en 10. En ce qui concerne les régimes météorologiques, nous avons repris le classement défini dans les comparaisons graphiques.

Le coefficient de TSCHUPROW ainsi calculé est égal à 0,16. La corrélation entre le caractère magnétique d'un jour et le régime établi quatre jours plus tard est faible. L'écart à l'indépendance est dû en très grande partie à l'absence, remarquable dans le tableau de contingence, de caractères magnétiques forts, $K > 30$, précédant des régimes zonaux. Il y a lieu de noter que la proposition inverse n'est pas vérifiée : une minorité non négligeable de cas de régimes à développements anticycloniques correspondent à des caractères magnétiques peu élevés. Il semble donc qu'il y ait superposition aux situations météorologiques initiales d'un mécanisme d'évolution faisant disparaître les régimes quasi zonaux à la suite d'une importante agitation magnétique.

Les résultats précédents montrent l'importance de l'examen détaillé des cas de caractères magnétiques journaliers $K > 30$. Il importe de préciser la nature des développements anticycloniques qui les suivent de quatre jours. Nous avons groupé les caractères $K > 30$ en 4 classes : 30-35; 35-40; 40-45; > 45 . Les développements anticycloniques ont été classés en 4 groupes suivant leur origine : subtropicale (comprenant la majorité du cas continental) - polaire - double origine (polaire et subtropicale) sans soudure des poussées anticycloniques correspondantes - double origine mais avec barrage par soudure.

Nous n'avons trouvé aucune corrélation remarquable entre les deux populations, mais le tableau de contingence montre que le régime avec soudure

entre les poussées anticycloniques subtropicales et polaires est relativement le plus fréquent (44 % des cas). Comme une valeur élevée du caractère K est l'indice probable d'un orage magnétique, l'hypothèse d'une double réaction troposphérique (une d'origine tropicale et une d'origine polaire) à une perturbation solaire, que nous avons faite uniquement par voie théorique, ne semble pas à rejeter. Dans ces conditions il nous a paru intéressant de procéder à une étude systématique des évolutions des situations météorologiques, consécutives aux orages magnétiques.

CHAPITRE V

ETUDE DES REGIMES METEOROLOGIQUES

CONSECUTIFS AUX ORAGES MAGNETIQUES

Nous avons étudié systématiquement les évolutions de la situation météorologique consécutives aux orages magnétiques pour deux périodes, dont la différence réside essentiellement dans les documents météorologiques utilisés. La première va de juillet 1929 à juillet 1939, soient 10 ans. Les cartes météorologiques correspondantes des Bulletins Quotidiens d'Etudes de l'O.N.M n'ont été établies qu'au sol. La deuxième va de janvier 1946 à Mars 1950 : l'identification des situations météorologiques a été faite comme dans le chapitre précédent sur les cartes au sol et en altitude (700 et 500 milibars) des Bulletins Quotidiens d'Etudes récents. Toutes ces cartes couvrent sensiblement la même étendue que celle déjà délimitée au chapitre III.

La liste des orages magnétiques considérés entre juillet 1929 et janvier 1948 nous a été communiquée par E. et O. THELLIER. A partir de janvier 1948, nous avons utilisé les perturbations magnétiques relevées dans les Bulletins d'Information ou les messages "Ursigramme" du Laboratoire National de Radio-électricité. Nous avons retenu la classification qui a servi de base aux travaux de E. et O. THELLIER (25 et 26) : orages à début brusque - orages à début progressif - orages sans caractère net - et dans chacune de ces catégories, orages forts et normaux. Nous avons donc en tout six sortes d'orages magnétiques. Dans la première période considérée, nous avons étudié 138 cas d'orages magnétiques et dans la deuxième 58 seulement. L'étude porte donc au total sur 196 perturbations magnétiques.

Soit J la date d'un orage magnétique considéré. Nous avons étudié les situations météorologiques journalières correspondantes depuis J-1 jusqu'à J+7 et nous les avons classées en régimes météorologiques suivant les principes définis précédemment. Nous avons donc été amenés à concevoir plusieurs types d'évolution météorologique entre les jours J-1 et J+7 :

a) Evolution prédominante zonale avec régression des développements anticycloniques considérés. C'est le cas du passage d'un rejet du régime d'Ouest (3ème cas) à une circulation quasi zonale (1er ou 2ème cas), par exemple.

b) Absence d'évolution (régime météorologique stable).

c) Evolution méridienne d'origine subtropicale prédominante. C'est le cas du passage d'un régime zonal à un rejet du régime d'Ouest par une extension d'un des anticyclones subtropicaux considérés.

d) Evolution méridienne d'origine polaire prédominante, avec extension

vers le Sud de l'anticyclone glacial.

e) Evolution méridienne d'origine double, polaire et subtropicale, sans qu'il y ait soudure des deux extensions anticycloniques.

f) Etablissement d'un barrage par soudure des extensions anticycloniques polaire et subtropicale.

Des méthodes statistiques modernes et, en particulier, l'application du test de STUDENT nous ont permis de préciser les éléments probables de ces évolutions.

1° - RESULTATS STATISTIQUES

a) Fréquence d'évolutions méridiennes :

Nous avons déterminé en premier lieu la fréquence probable d'une évolution méridienne du régime météorologique initial à la suite d'un orage magnétique. Cette évolution correspond aux cas (c), (d), (e) et (f).

Dans la première période (1929-1939) sur 138 cas étudiés, nous en avons trouvé 95 qui correspondent à cette évolution générale. En assimilant ce problème à celui du tirage des boules dans une urne, nous obtenons comme fréquence probable $f : 62 \% < f < 76 \%$. Dans la deuxième période (1946-1950) nous avons relevé 47 cas de cette évolution sur 58 et nous obtenons de même $70 \% < f < 92 \%$.

On peut donc dire que 2 orages magnétiques sur 3 au moins, sont suivis de développements d'invasions méridiennes de masses d'air d'origine tropicale ou arctique, modifiant temporairement la circulation atmosphérique générale, en moyenne zonale.

b) Origine probable de l'extension anticyclonique

Considérant les cas d'orages magnétiques suivis d'un développement d'invasions méridiennes de masses d'air, nous avons cherché à préciser l'origine de l'extension anticyclonique correspondante.

Nous avons distingué l'extension d'origine unique, polaire ou subtropicale (évolutions (c) et (d)), de l'extension d'origine double (évolutions (e) et (f)). Dans la première période sur 95 cas d'extensions anticycloniques nous en avons relevé 67 de la première catégorie et 28 de la deuxième. La fréquence probable de l'extension d'origine unique s'en déduit : $61 \% < f < 80 \%$. Dans la deuxième période un calcul identique nous a donné $48 \% < f < 78 \%$. On ne peut pas tirer une conclusion nette de ces valeurs, les deux catégories d'évolution étant également possibles.

Parmi les extensions anticycloniques d'origine unique, nous avons distingué celles d'origine subtropicale prédominante de celles d'origine polaire. Les fréquences probables des premières sont respectivement $52 \% < f < 71 \%$ pour la première période et $16 \% < f < 51 \%$ pour la deuxième. La encore les deux évolutions sont également possibles.

Le calcul au moyen du test de STUDENT des dates moyennes probables des extensions anticycloniques d'origine subtropicale et d'origine polaire, lorsqu'elles ont lieu, nous a donné les mêmes résultats pour les deux périodes considérées. Soit J la date de la perturbation magnétique, l'extension anticyclonique d'origine subtropicale débute en moyenne de J+1 à J+3 et celle d'origine polaire de J+3 à J+5.

En résumé, on ne peut parler de fréquence prépondérante d'une des évolutions (c), (d), (e) ou (f). Par contre, l'extension anticyclonique d'origine subtropicale, lorsqu'elle existe, paraît avoir lieu avant celle d'origine polaire.

c) Fréquence d'une invasion arctique

L'extension anticyclonique polaire, lorsqu'elle a lieu, s'accompagne généralement d'une descente aux latitudes moyennes de l'air arctique. Dans quelques cas nous avons repéré ce dernier phénomène sans que l'anticyclone polaire se soit notablement étendu, si bien que l'évolution n'a pas été classée dans l'une des catégories (d), (e) ou (f). Il nous a paru intéressant de calculer la fréquence probable de cette invasion d'air arctique, qui est parfois annoncée par l'apparition d'aurores polaires, visibles à nos latitudes.

Pour la première période nous avons trouvé 49 invasions arctiques sur nos cartes. La fréquence probable f s'en déduit : $26 \% < f < 44 \%$. Leur date moyenne probable d'apparition aux latitudes moyennes avec les mêmes notations qu'au paragraphe précédent est comprise entre J+3 et J+5. Pour la deuxième période les valeurs correspondantes sont respectivement $47 \% < f < 74 \%$, puis J+2 à J+4.

Il y a deux conclusions à tirer de ces chiffres. La première est que les évolutions météorologiques consécutives à un orage magnétique comportent fréquemment une invasion d'air arctique jusqu'aux latitudes moyennes. La deuxième est que les seules données au sol ne permettent pas de caractériser les expulsions d'air arctique aussi nettement et aussi rapidement que les modifications apportées aux éléments en altitude, mises en évidence en France dès 1938 (30, 31 a et b).

d) Fréquence de l'évolution caractéristique prévue par voie théorique

Nous avons calculé la fréquence probable d'existence de l'évolution classée (f), qui constitue dans la basse atmosphère le témoin le plus caractéristique du mécanisme d'action d'une perturbation solaire, dont nous avons émis l'hypothèse au début de cette étude. Nous avons calculé, en même temps, les éléments probables de cette évolution, J désignant toujours la date de l'orage magnétique.

Pour la première période nous avons trouvé comme fréquence probable $10 \% < f < 25 \%$ et pour la deuxième $12 \% < f < 37 \%$. Cette faiblesse de la fréquence des évolutions caractéristiques est, peut-être, en rapport d'une part avec les caractères de la situation isobarique initiale et d'autre part avec le peu d'étendue, que couvrent les cartes météorologiques étudiées systématiquement vis à vis d'un hémisphère entier. Il n'est pas impossible que

dans un grand nombre de cas, où nous n'avons pas repéré cette évolution, celle-ci ait lieu dans une région, où nous n'avons pas la possibilité de l'identifier. Dans une période comme dans l'autre, nous avons trouvé pour ces évolutions une extension anticyclonique subtropicale prenant naissance en moyenne de $J + 2$ à $J + 3$ et une invasion arctique aux latitudes moyennes accompagnée d'une extension anticyclonique polaire de $J+3$ à $J+5$.

Il est très important de remarquer que la majorité (62 %) de ces évolutions caractéristiques a été identifiée en Février (19 %), Mars (16 %), Avril (14 %) et Mai (13 %), donc dans la période où l'ozone des régions polaires se réchauffe fortement (16a) et pendant laquelle sa teneur devient maxima (18 et 19). Les autres cas se répartissent entre les différents mois, mais il est à noter que nous n'en avons pas trouvé un seul en Décembre, mois pendant lequel l'abaissement de température de l'ozone des régions polaires risque de mettre en défaut la conception du champ thermique normal de l'ozonosphère, que nous avons exposée.

e) Relations entre le régime de circulation initial et son évolution

Nous avons calculé qu'un tiers au plus des orages magnétiques n'était pas suivi d'une évolution météorologique avec développements anticycloniques. Il est intéressant de savoir si ces perturbations magnétiques ont été observées dans une situation initiale particulière, comportant par exemple des extensions anticycloniques rejetant le régime d'Ouest, auquel cas l'absence d'évolution ne serait pas en contradiction formelle avec la majorité des autres cas. Le problème peut se traiter de façon plus générale en cherchant la corrélation entre la situation météorologique accompagnant chaque orage magnétique et son évolution. Nous avons établi à cet effet un tableau de contingence en considérant d'une part les six cas d'évolution retenus (a) ... (f) et en précisant d'autre part les régimes de circulation initiaux. Pour ces derniers nous avons considéré les sept catégories suivantes : Régime d'Ouest; Régime d'Ouest avec extension modérée des anticyclones subtropicaux; Rejet du régime d'Ouest en distinguant deux cas d'après l'origine (subtropicale ou polaire) de l'extension anticyclonique; Barrage anticyclonique partagé en trois cas suivant sa nature : subtropicale, polaire, soudure des extensions anticycloniques subtropicale et polaire.

Les coefficients de TSCHUPROW ainsi calculés ont respectivement les valeurs suivantes : 0,35 pour les années 1929 à 1939 et 0,49 pour la période 1946- 1950. Il y a donc une relation nette entre le régime de circulation existant au moment d'un orage magnétique et son évolution. Ce résultat est intéressant du fait de la faiblesse des coefficients de corrélation calculés dans de nombreux travaux d'héliométéorologie, où l'on n'a généralement pas tenu compte de la situation météorologique initiale. Parmi les relations individuelles entre les caractères partiels des populations, signalons comme les plus remarquables dans les tableaux de contingence des deux périodes étudiées :

1° - L'absence d'évolution et, à moindre titre, l'évolution prédominante zonale (évolutions cotées (b) et (a)) avec les barrages anticycloniques d'origines subtropicale d'une part et d'origine double d'autre part.

2° - Les évolutions méridiennes d'origine double (évolutions cotées (e)

et (f) avec les régimes de circulation quasi zonaux à faible développement anticyclonique d'origine subtropicale.

f) Relations entre les évolutions considérées et l'époque de leur apparition

Nous avons vu que pour l'évolution caractéristique (f), la considération de l'époque de son apparition semblait importante. Nous avons recherché si une même relation s'observait pour toutes les évolutions considérées. Nous avons donc établi pour l'ensemble des deux périodes étudiées une table de contingence en considérant d'une part les douze mois de l'année et d'autre part les différents types d'évolution. Le coefficient de TSCHUPROW calculé étant très faible, on peut pratiquement conclure à l'indépendance des deux populations. Le seul caractère partiel qui s'en éloigne notablement est constitué par la case du tableau de contingence groupant le mois de Février et les évolutions méridiennes (e) et (f), c'est-à-dire l'extension anticyclonique d'origines polaire et subtropicale.

g) Relations entre les évolutions considérées et la nature des orages magnétiques

O. et E. THELLIER ont soutenu l'idée d'une différence entre les orages magnétiques à début brusque, qui seraient dus au rayonnement corpusculaire des éruptions chromosphériques, et les autres orages, qui seraient dus au rayonnement continu des régions M (25 et 26). En raison des hypothèses que nous avons faites sur le mécanisme d'action de l'activité solaire dans l'ozonosphère, il est peu probable que cette différence puisse se retrouver dans les évolutions de la basse atmosphère, consécutives aux perturbations magnétiques. Il est néanmoins intéressant de le vérifier statistiquement. Nous avons donc établi une table de contingence en considérant d'une part les différents types d'évolutions et d'autre part les diverses catégories d'orages magnétiques (début brusque, début progressif, sans caractère et dans chacune de ces classes orages normaux et forts). La faiblesse du coefficient de TSCHUPROW fait conclure à une indépendance probable des deux populations. Le seul caractère partiel du tableau de contingence, qui risque de s'écarter de cette indépendance, groupe les orages forts à début brusque et les évolutions méridiennes correspondant à des extensions anticycloniques d'origines polaire et subtropicale.

2° - INTERPRETATION DES RESULTATS

L'ensemble des comparaisons graphiques et statistiques effectuées nous amène à cette conclusion (au moins à titre provisoire, car un résultat définitif exigerait des études plus complètes et des moyens d'investigations atmosphériques plus perfectionnés) que parmi les phénomènes solaires susceptibles d'action sur l'atmosphère ceux qui donnent lieu à des perturbations géomagnétiques importantes sont les plus caractéristiques. Leur influence s'étend jusque dans la basse atmosphère par le développement dans le régime de circulation initial d'invasions méridiennes de masses d'air. Une telle conclusion, nous l'avons vu, ne contredit en rien les hypothèses d'HAURWITZ (15 a et b), qui nous ont servi de cadre de travail. On peut vérifier qu'elle

est compatible avec les résultats obtenus par d'autres auteurs, qui ont suivi des voies différentes de la nôtre.

Le développement d'invasions méridiennes de masses d'air, consécutif aux perturbations solaires, est susceptible d'expliquer les résultats décevants des innombrables travaux statistiques d'héliométéorologie qui ont opéré sur des moyennes hémisphériques ou annuelles d'éléments météorologiques. En ce qui concerne la pression atmosphérique, rappelons que la seule remarque intéressante obtenue par CLAYTON a été l'intensification des centres d'action, situés normalement entre 40° et 60° de latitude et leur déplacement simultané vers les Pôles dans les périodes de fort accroissement de l'activité solaire. Ainsi les seuls nombres de WOLF ont permis à CLAYTON d'obtenir un résultat assez voisin du nôtre : l'auteur avait mis en évidence dès 1925 que l'influence la plus décelable de l'activité solaire consistait en une évolution des centres d'action de la circulation générale (8 a et b).

Nous avons déjà fait remarquer que deux recherches américaines récentes aboutissaient également à des conclusions compatibles avec les nôtres : leurs auteurs ont mis statistiquement en évidence une forte proportion de régimes avec blocage des perturbations de l'Océan, donc avec invasions méridiennes de masses d'air intensifiées, aux périodes d'accroissement du nombre des taches (10-11).

Les invasions tropicales en certains points du globe et les expulsions arctiques en d'autres, qui sont caractéristiques d'extensions méridiennes des centres d'action anticycloniques, expliquent également l'échec de toutes les tentatives de corrélation faites entre les températures (qu'il s'agisse de données en une région déterminée, de moyennes hémisphériques ou annuelles) d'une part et le nombre de taches solaires d'autre part. La considération de la variabilité de la température en fonction de l'activité solaire semble devoir offrir, par contre, un plus grand intérêt : S.W. VISSER a ainsi mis récemment en évidence que les grandes variabilités de températures d'hiver aux Pays Bas comme à Prague étaient liées aux fortes activités solaires (14 b).

En ce qui concerne les précipitations des remarques identiques s'imposent. Nous avons vu que les calculs de corrélation entre le nombre de taches et les hauteurs moyennes de pluie sur des continents entiers n'avaient été suivis d'aucun résultat net. Les raisons de cet échec sont exactement les mêmes que pour les moyennes de températures. Si une étude locale, comme celle de GUYOT (13), a pu mettre en évidence que les années les moins pluvieuses en Suisse étaient corrélées aux nombres élevés de WOLF, c'est que le régime pluviométrique suisse est très influencé par l'extension des anticyclones subtropicaux vers le Nord. Il ne s'agit là d'ailleurs que d'un résultat moyen, certaines années comme 1910, par exemple, ayant été très pluvieuses, bien que le nombre annuel moyen de WOLF ait été élevé. Plus récemment, dans une étude sur les fluctuations de la circulation atmosphérique dans la zone tempérée au cours du cycle undecennal des taches solaires, F. BAUR (32 a et b) a trouvé pendant les maxima du rayonnement des facules solaires, riche en ultra-violet, une extension importante vers le Nord des anticyclones subtropicaux en été, ce qui se traduit en Europe Centrale par de faibles précipitations et des températures exceptionnellement élevées. Des méthodes statistiques modernes lui ont permis de démontrer que les pluies et les températures d'été en Europe Centrale n'étaient pas indépen-

dantes de l'époque considérée à l'intérieur de chaque cycle solaire.

Notons qu'au cours d'une étude sur la récurrence des invasions polaires R. BOUTET (33) a attiré l'attention sur la violente expulsion d'air arctique du 10 Février 1946, qui descendit jusqu'aux latitudes d'Afrique du Nord à la suite d'une perturbation solaire gigantesque, ayant donné lieu à d'importants orages ionosphérique et magnétique; nous avons d'ailleurs choisi ce dernier comme exemple caractéristique.

Plus récemment P. FONTAINE a conclu d'une étude sur les gouttes d'air froid que des corrélations intéressantes semblent exister entre l'activité solaire et les invasions froides en général (36).

Cette critique bibliographique nous permet donc d'affirmer que nos résultats ne sont nullement incompatibles avec nombre de travaux antérieurs sur le rôle de l'activité solaire dans l'atmosphère terrestre et qu'ils sont même susceptibles de démêler les causes de certains échecs dans les recherches statistiques d'héliométéorologie.

CHAPITRE VI

POSSIBILITES D'APPLICATION A LA PREVISION DU TEMPS

La plupart des travaux statistiques d'héliométéorologie ont eu pour but de constituer une base aux prévisions à longue échéance. ABBOT, par exemple, a récemment fait des essais de prévision de températures à Washington un an à l'avance. Les valeurs des coefficients de corrélation trouvées sont généralement si peu significatives qu'elles vouent d'avance à l'échec toutes les tentatives de ce genre.

Il y a lieu d'examiner si les résultats de nos travaux peuvent trouver une meilleure utilisation dans l'établissement des prévisions du temps.

1° - PREVISION A ECHEANCE DE QUELQUES JOURS

Pour tenir compte de l'activité solaire dans l'établissement d'une prévision à échéance de quelques jours, les Météorologistes ont besoin d'être quotidiennement renseignés sur l'état du Soleil, à défaut de la prévision actuellement impossible des éruptions chromosphériques. Les messages "ursigramme", émis par le Bureau Ionosphérique Français, sont de nature à satisfaire ces besoins. Leur contenu détaillé a déjà été exposé (24 c). Plusieurs mois de dépouillement de ces messages nous ont appris qu'il était difficile de suivre avec précision les centres d'activité du Soleil et les éruptions chromosphériques, à cause des interruptions d'observations spectrohéliographiques par temps couvert. En attendant la mise au point de la technique de réception du rayonnement solaire de fréquence radioélectrique et de l'interprétation des résultats, les messages "P.I.D.B." et "M.A.G." des ursigrammes, qui nous informent régulièrement sur les orages ionosphériques et magnétiques, sont les meilleurs indicateurs des grandes perturbations solaires. L'interprétation détaillée des messages "M.A.G." est particulièrement intéressante puisqu'en plus des phénomènes particuliers (crochets, pulsations, orages), les caractères magnétiques de la journée y sont chiffrés et peuvent aisément servir au calcul d'un indice quotidien de l'agitation magnétique. La considération continue de ces renseignements peut donc permettre au météorologiste de prévoir dans la zone couverte par nos cartes d'études un développement des invasions méridiennes de masses d'air, consécutif aux fortes perturbations magnétiques, avec des chances raisonnables de succès. La généralité de cette évolution serait sans intérêt pour la prévision du temps, si la considération des cartes synoptiques correspondantes ne permettait de préciser la nature et la position probables des extensions anticycloniques éventuelles ainsi que la possibilité et la direction d'une invasion arctique. Dans l'établissement d'une prévision à échéance de quelques jours, la considération des caractères magnétiques, en tant qu'indicateurs de l'activité solaire, peut donc apporter des éléments intéressants pour

prévoir l'évolution du champ isobarique et des masses d'air. Par contre, une prévision basée uniquement sur des observations solaires directes ou indirectes, sans tenir compte du régime météorologique existant, ne peut conduire à aucun résultat sérieux.

A titre d'exemple nous détaillons quelques cas récents, où il eut été intéressant de tenir compte de la présence d'orages magnétiques dans l'établissement des cartes météorologiques prévues. La date initiale prise en référence est celle de l'orage magnétique correspondant.

a) 7 Février 1946 - Orage sans caractère, fort

Le régime de circulation initial (6, 7 et 8 Février) est un courant d'Ouest quasi zonal avec une faible extension de l'anticyclone des Açores. C'est le 9 Février que débute une importante extension de cet anticyclone vers le Nord. Le 10 Février une forte invasion d'air arctique, visible le jour précédent à haute altitude (la description détaillée de ce phénomène se trouve dans la référence bibliographique (33)), s'étend au sol sur l'Atlantique et la mer du Nord. A partir du 11 jusqu'au 14 Février s'établit un barrage du régime d'Ouest par soudure de l'anticyclone polaire et de celui des Açores.

b) 23 Avril 1946 - Orage à début progressif, fort

Le régime de circulation initial est ici un rejet du courant d'Ouest par une extension vers le Nord Est, c'est-à-dire sur l'Europe Occidentale, de l'anticyclone atlantique. Du 25 au 27 Avril, une forte invasion d'air arctique atteint l'Angleterre et s'étend sur l'Atlantique à de basses latitudes. A partir du 26 Avril s'établit un barrage du régime d'Ouest par soudure des Anticyclones polaire et atlantique.

c) 7 Juin 1946 - Orage sans caractère

Partant d'un régime quasi zonal, on voit se développer simultanément à partir du 10 Juin une invasion arctique, l'anticyclone atlantique vers le Nord et l'anticyclone polaire vers le Sud. Ces derniers se soudent le 12 pour former un blocage du régime d'Ouest.

d) 30 Août 1946 - Orage à début progressif

Le régime initial est un courant d'Ouest quasi zonal. A partir du 1er Septembre les anticyclones atlantique et polaire s'étendent respectivement vers le Nord et le Sud pour former un barrage du régime d'Ouest les 4 et 5 septembre. Simultanément une invasion arctique, repérable le 3 Septembre s'étend sur l'Atlantique Nord.

e) 21 Septembre 1946 - Orage à début brusque, fort

Initialement on a affaire à un rejet du régime d'Ouest par une extension de l'anticyclone atlantique. A partir du 25, une forte expulsion d'air arctique sur l'Océan s'accompagne d'un barrage du régime d'Ouest par soudure des anticyclones atlantique et polaire, ce régime persistant au-delà du 27 Septembre.

f) 16 Février 1947 - Orage à début brusque

L'évolution est ici principalement constituée par une forte invasion d'air arctique sur tout l'Océan atlantique et un développement exceptionnel de l'anticyclone polaire, visibles tous deux à partir du 19 Février.

g) 9 Novembre 1947 - Orage à début brusque

Comme dans le cas précédent, l'évolution prédominante est constituée par une invasion arctique à basse latitude sur l'Océan Atlantique et un fort développement de l'anticyclone polaire, visibles sur les cartes à partir du 12 Novembre.

h) 16 Mai 1948 - Orage à début brusque

Partant d'un rejet du régime d'Ouest, dû à un développement vers le Nord Est de l'anticyclone atlantique, le barrage par soudure des anticyclones atlantique et polaire est réalisé dès le 19 Mai; l'invasion d'air arctique est visible jusqu'aux basses latitudes sur l'Océan Atlantique à partir du 20 Mai et une forte extension de l'anticyclone polaire lui fait suite.

i) 21 Février 1949 - Orage à début brusque

Une extension initiale vers le Nord de l'anticyclone atlantique provoque un rejet du régime d'Ouest. On observe à partir des 26 et 27 Février la formation d'un barrage par un développement de l'anticyclone polaire et une forte expulsion arctique en direction de l'Europe.

j) 19 Mars 1950 - Orage à début brusque, fort

Le régime de circulation initial est quasi zonal. L'extension vers le Nord de l'anticyclone des Açores débute le 22 Mars. Une invasion arctique est visible jusqu'en Ecosse le 24, mais reste peu importante; par contre, dès le 25 Mars le barrage du régime d'Ouest est réalisé par un faible développement de l'anticyclone polaire et l'extension prépondérante des hautes pressions subtropicales.

Ces quelques exemples suffisent à montrer qu'il semble possible de tirer parti, en prévision du temps, des observations magnétiques, incluses quotidiennement dans les ursigrammes, à condition d'interpréter les résultats généraux de notre étude en fonction du régime de circulation atmosphérique initial. Il est à noter qu'à l'observatoire de Zi - Ka - Wei on se sert avec succès des mesures ionosphériques simultanément aux données des cartes météorologiques pour prévoir les changements de type de temps (34 a et b). Il s'agit là d'une méthode très voisine de celle que nous suggérons.

2° - PREVISION A LONGUE ECHEANCE

Les résultats que nous avons mis en évidence sont très difficilement utilisables en prévision à longue échéance. L'impossibilité actuelle de prévoir les éruptions chromosphériques (24 c) nous oblige à nous contenter d'un raisonnement trop simpliste pour en tirer des conclusions précises.

On peut s'appuyer sur le fait que les centres d'activité éruptifs du Soleil suivent un cycle à peu de chose près comparable à la période undécennale des taches. Les orages magnétiques à début brusque seront donc plus nombreux et plus forts dans les années qui encadrent les maxima undécennaux de l'activité solaire. Par contre, les régions M, responsables des orages à début progressif, semblent prédominer pendant les années qui précèdent les minima du cycle undécennal des taches (35). Il peut donc exister une compensation partielle des effets de ces perturbations magnétiques à l'intérieur du cycle undécennal, mais d'une façon générale les orages à début brusque sont plus nombreux et surtout plus forts que ceux à début progressif. En tout état de cause, il est logique de prévoir un développement de régimes à invasions méridiennes de masses d'air, au moins à l'intérieur de la zone couverte par nos cartes d'études, dans les années voisines des maxima du cycle undécennal des taches. Il se traduit en moyenne, comme la fait remarquer F. BAUR, par une extension vers le Nord des anticyclones subtropicaux en été, donc par une faiblesse des pluies en Europe Centrale et par des températures élevées, au cours des étés correspondants (32 a et b). L'intérêt des précipitations estivales pour les grands barrages hydroélectriques met en relief l'importance de cette conclusion, qui confirme une étude précédente faite en Suisse par GUYOT (13). On peut encore ajouter à ces résultats la grande variabilité des températures observées au moment des fortes activités solaires (14 b). La considération du cycle undécennal de l'activité solaire est donc susceptible d'apporter à l'établissement d'une prévision à longue échéance des éléments permettant de préciser la répartition de grands phénomènes saisonniers. Néanmoins, il ne peut s'agir là que d'une prévision d'éléments moyens, chaque cycle d'activité solaire ayant son caractère propre, et, par conséquent, son influence propre sur l'atmosphère.

A titre d'exemple, nous avons cherché à relier d'une façon plus précise que ne l'ont fait nos devanciers les précipitations en Suisse et dans les Alpes Françaises au cycle undécennal des taches solaires. Le choix de ces régions provient principalement de l'importance attachée à toute prévision à longue échéance des précipitations correspondantes pour les barrages hydroélectriques.

a) Précipitations en Suisse

Nous avons repris les données de GUYOT (13). L'auteur a calculé la hauteur moyenne des pluies annuelles entre 1864 et 1930, relevées en 25 stations suisses. La comparaison du graphique de ces précipitations et de celui des nombres annuels moyens de WOLF correspondants lui a fait énoncer que les périodes de sécheresse avaient lieu pendant les fortes activités solaires. Comme il s'agit là seulement d'un résultat moyen, les courbes de hauteurs de pluie et celles des nombres de taches n'étant pas rigoureusement en opposition de phase, il nous a paru intéressant de vérifier à partir des données numériques de GUYOT si le coefficient de corrélation était significatif. Nous avons obtenu les résultats suivants : moyenne des précipitations 1210 mm; moyenne des nombres de WOLF 42; coefficient de corrélation entre précipitations et nombres de WOLF - 0,34, avec 0,24 comme valeur minima significative calculée par le test de STUDENT.

La corrélation observée graphiquement par GUYOT est donc vérifiée numériquement, mais le coefficient demeure faible.

b) Précipitations dans les Alpes Françaises

Parmi tous les renseignements concentrés par les centres hydrométéorologiques pour l'étude de l'exploitation rationnelle des barrages, nous avons retenu les séries d'observations pluviométriques annuelles entre 1891 et 1930 dans les 13 stations suivantes :

a) Nantua (Ain), Sallanches (Haute-Savoie) et Beaurepaire (Isère), correspondant au cours moyen du bassin du Rhône.

b) La Tronche (Isère), Corps (Isère), Villard de Lans (Isère), Grenoble (Isère) et Albertville (Savoie), stations situées dans le bassin de l'Isère.

c) Crest (Drôme) et Orange (Vaucluse), correspondant au cours inférieur du bassin du Rhône.

d) Apt (Vaucluse), Sisteron (Basses-Alpes) et Faucon du Caire (Basses-Alpes), stations situées dans le bassin de la Durance.

Nous avons cherché s'il existait des variations caractéristiques des précipitations annuelles en ces stations à l'intérieur des cycles solaires correspondants, classés d'après les valeurs des nombres de WOLF moyens annuels, calculés par BRUNNER (1).

Nous avons donc établi un tableau de contingence entre les années successives de chacun des cycles solaires considérés et les précipitations observées dans les 13 stations citées. Pour rendre ces dernières comparables entre elles, nous avons calculé pour chacune des 13 séries pluviométriques les pourcentages successifs des hauteurs de pluie annuelles à leurs moyennes respectives sur 40 ans (1891-1930), ce qui nous a donné 520 rapports comparables entre eux. Nous avons réparti ensuite ces pourcentages, soit p , en 6 catégories : $p < 70\%$ - $70\% \leq p < 85\%$ - $85\% \leq p < 100\%$ - $100\% \leq p < 115\%$ - $115\% \leq p < 130\%$ - $p \geq 130\%$. Les années successives d'observations (1891 à 1930) ont été réparties en 12 catégories, suivant leur position par rapport aux maxima des nombres de WOLF. Soit M l'année correspondant à l'un de ces derniers, nous obtenons successivement dans un même cycle solaire les années $M, M+1, M+2, \dots, M+11$.

Le calcul du coefficient de TSCHUPROW donne une valeur de 0,24, faible mais non négligeable. Les écarts à l'indépendance du tableau de contingence permettent de déterminer les caractères partiels des éléments les plus responsables de la relation observée. Nous obtenons ainsi comme liaisons remarquables :

1°) La quatrième année ($M+4$) après un maximum d'activité solaire et les plus faibles précipitations ($p < 70\%$).

2°) Les cinquième et neuvième années ($M+5$ et $M+9$) après un maximum d'activité solaire et les plus fortes précipitations ($p \geq 130\%$).

3°) La première année ($M+1$) après un maximum d'activité solaire et de faibles précipitations ($p < 70\%$ et $70\% \leq p < 85\%$).

4°) L'année d'un maximum d'activité solaire (M) et des précipitations

relativement élevées ($115 \% \leq p < 130 \%$), ce qui explique la faiblesse des coefficients de corrélation directement calculés entre nombres de taches et hauteurs de pluie.

5°) La dixième année ($M+10$) après un maximum d'activité solaire et des précipitations moyennes ($100 \% \leq p < 115 \%$).

Les anomalies les plus remarquables des précipitations annuelles des Alpes Françaises à l'intérieur d'un cycle undécennal d'activité solaire sont donc les suivantes :

a) Les plus faibles précipitations ont lieu la première année consécutive à un maximum de nombres de WOLF. Dans la publication de GUYOT (13), cette remarque intéressante avait déjà été formulée d'après les comparaisons graphiques effectuées. Ce résultat peut provenir d'un déplacement moyen vers le Nord du champ stable anticyclonique subtropical, consécutivement aux fortes tempêtes solaires, ayant lieu à une époque voisine des maxima des nombres de taches et traduites par de violents orages magnétiques à début brusque. La Suisse et les Alpes Françaises sont, en effet, placées souvent en bordure Nord de la ceinture anticyclonique subtropicale et les répercussions d'une extension méridienne de ces hautes pressions peuvent jouer un rôle important.

b) De faibles précipitations se produisent encore la quatrième année après un maximum du nombre des taches. Les orages magnétiques à début progressif, traduisant l'activité des régions M du Soleil, subissent précisément une recrudescence en intensités et en quantités dans les années précédant les minima du nombre des taches au cours des cycles indécennaux. Il n'est donc pas impossible de rattacher la faiblesse des précipitations observées la quatrième année après un maximum des nombres de WOLF, à ce phénomène, susceptible également de provoquer une extension méridienne vers le Nord des anticyclones subtropicaux.

c) Les plus fortes précipitations sont observées principalement les cinquième et neuvième années consécutives à un maximum du nombre de WOLF, donc aux environs des minima d'activité solaire.

Il est à noter que ces résultats concordent avec ceux de l'étude analogue de F. BAUR sur les précipitations en Europe Centrale (32 a et b).

L'exemple que nous venons de choisir montre ce que l'on est en droit d'espérer actuellement de la prévision à longue échéance des grands phénomènes saisonniers à partir des données des cycles d'activité solaire. Le champ d'application de la méthode est principalement limité par l'impossibilité où l'on se trouve actuellement de prévoir convenablement les caractères précis d'un cycle undécennal du Soleil.

CONCLUSIONS

Partant d'hypothèses émises récemment sur le rôle des éruptions chromosphériques dans l'ozonosphère, nous sommes parvenus aux résultats suivants, concernant le rôle de l'activité solaire dans l'atmosphère météorologique :

1° - Les phénomènes solaires donnant lieu à des orages ionosphériques et magnétiques semblent les plus susceptibles d'une influence notable sur l'évolution et le déplacement des masses d'air.

2° - Une extension méridienne des centres anticycloniques a souvent lieu entre les deuxième et cinquième jours qui suivent une perturbation magnétique. Simultanément on observe une intensification des invasions méridiennes de masses d'air, en particulier une remarquable expulsion d'air arctique aux latitudes moyennes.

3° - Les résultats précédents ne concernent que les régions pour lesquelles nos cartes d'études météorologiques ont été établies, c'est-à-dire approximativement l'Europe Occidentale et l'Est de l'Atlantique Nord.

Les répercussions complexes de l'activité solaire sur la circulation générale de l'atmosphère sont loin d'être élucidées par notre étude. La solution complète d'un problème aussi vaste exigera non seulement des travaux plus complets, tenant compte des énergies mises en jeu dans les perturbations solaires comme dans la circulation atmosphérique mais aussi des moyens perfectionnés de sondages de la haute atmosphère. Ce n'est que par une collaboration étroite entre Astrophysiciens et Météorologistes que des progrès sensibles pourront être réalisés dans ce domaine d'investigations.

Manuscrit reçu le 15 mai 1952

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - W. BRUNNER. - Terr. Magn. 44, p. 175, 1939
- 2 - E.H. MUNRO. - Terr. Magn. 53, p. 241-246, 1948
- 3 - M. NICOLET. - Série d'articles dans Ciel et Terre 1941 et 1943.
- 4 - C.G. ABBOT. - Multiples publications dans Smiths. Miscell. Collect.
- Voir en particulier Annual Rep. Smiths. Inst. p. 119-153, 1944.
- 5 - J. CABANNES. - La Météorologie, p. 57-68, Janv. Mars 1948.
- 6 - M. PARANJPE. - Quart. J. Roy. Met. Soc. 64, p. 459-476, 1938.
- 7 - A. PRUDHOMME. - a) La Météorologie, p. 85-98, Avril Juin 1950.
b) Ann. Univ. Lyon 53, B. fas. 4, p. 36-46, fév. 1949.
- 8 - H.H. CLAYTON. - a) Mémorial O.N.M. 1925
b) Solar relations to Weather and Life - Mass. 1943.
- 9 - H.C. WILLETT. - a) J. of Meteor. vol. 6, n° 1, p. 34-50, fév. 1949.
b) Geografiska Annaler, Bd XXXI, H I-4, p. 294-315, 1949
c) Harvard Obs. Monographs n° 7, p. 369-381, Camb. Mass. 1948.
- 10 - I.I. SCHELL. - Bull. Amer. Met. Soc. 30, n° 8, p. 292-294, Oct. 1949.
- 11 - R.D. ELLIOTT a) T.B. SMITH - J. of Meteor. vol. 6, n° 2, p. 67-85, Avril 1949.
- 12 - M. SMAGORINSKY a) G.W. BRIER. - Bull. Amer. Met. Soc. 30, n° 7, p. 256-257, Sept. 1949.
- 13 - E. GUYOT. - Ann. Guebhard Severine, p. 300-305, 1933.
- 14 - S.W. VISSER. - Ann. Geophys.
a) t. 3, fas. 1, p. 15-23, 1947.
b) t. 4, fas. 1, p. 65-73, 1948.
c) t. 5, fas. 1, p. 74-82, 1949.
- 15 - B. HAURWITZ. - a) Trans. Amer. Geophys. Un. 27, p. 161-163, Avril 1946.
b) Harvard Obs. Monographs n° 7, p. 353-367, Camb. Mass. 1948.
- 16 - A. et E. VASSY. - a) J. de Phys. 2, p. 81, 1941.
b) C.R.A.S. Paris, t. 208, p. 1518, 1939.
c) La Météorologie, p. 4. Janv. Fév. 1939.

- 17 - E.H. GOWAN. - Quart. J. Roy. Met. Soc. Supp. 62, p. 34, 1936.
- 18 - G.M.B. DOBSON. - Proc. Roy. Soc. A 129, p. 411-433, 1930.
- 19 - G.M.B. DOBSON, A.W. BREWER a. B.M. CWILONG. - Proc. Roy. Soc. A 185,
p. 144-175, 1946.
- 20 - E. TONBERG a. D. CHALONGE. - Quart. J. Roy. Met. Soc. Supp. 62, p. 55,
1936.
- 21 - P. LEJAY. - Quart J. Roy. Met. Soc. Supp. 62, p. 58-59, 1936.
- 22 - A. ADEL, W.M. SLEPHER a. E.F. BARKER. - Phys. Rev. t. 47, p. 950, 1935.
- 23 - J. DEVAUX. - C.R.A.S. Paris a) t. 193, p. 1207, 1931.
b) t. 201, p. 1520, 1935.
- 24 - L. d'AZAMBUJA. - a) J. de Phys. X, p. 274-281, 1939.
b) L'Astronomie, p. 97-121, Mars 1939.
c) L'Astronomie, p. 241-252, Sept. Oct. 1949.
- 25 - E. THELLIER. - Relations entre les phénomènes solaires et géophysiques -
Colloque de Lyon 1947, p. 167-181 - Revue d'Optique 1949.
- 26 - E. et O. THELLIER. - C.R.A.S. Paris t. 227, p. 1044-1046, 1948.
- 27 - J. BARTELS. - Terr. Magn. 37, p. 1-52, 1932.
- 28 - F.W.P. GOTZ - Relations entre les phénomènes solaires et géophysiques -
Colloque de Lyon 1947, p. 287-293. Revue d'Optique 1949.
- 29 - J. VIALAR. - Calcul des Probabilités et Statistique. Paris 1947.
- 30 - V. MIRONOVITCH et A. VIAUT. - C.R.A.S. Paris t. 207, p. 866, 1938.
- 31 - V. MIRONOVITCH. - a) C.R.A.S. Paris t. 222, p. 1350-1352, 1946.
b) La Météorologie, p. 214-219, Juin 1946.
- 32 - F. BAUR. - a) Met. Rundschau, 2 J. 1/2 H. p. 10-15, 1949.
b) Arc. f. Met. Geophys. u. Bioklim. A, Bd I, p. 358-374,
Wien 1949.
- 33 - R. BOUTET. - Rev. Sci. Fr. 84, p. 596-604, 1946.
- 34 - S. GHERZI. - a) Bull. Amer. Met. Soc. Vol. 27, n° 3, p. 114-117, Mars 1946.
b) Nature London vol. 165, p. 38, Janv. 1950.
- 35 - M. WALDMEIER. - Terr. Magn. vol. 51, p. 537-542, Déc. 1946.
- 36 - P. FONTAINE. - La Météorologie, p. 98-112, Avril Juin 1951.
-

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

LES PROCEDES HYGROMETRIQUES

Les membres du Jury

BERNARD

DUFAY

JANIN

QUENEY

Vu et approuvé

Le Doyen ,

R. DOUIN

Vu et permis d'imprimer

Lyon, le 20 Mai 1952

Le Recteur, Président du Conseil de l'Université

André ALLIX

